



We are Nitinol.™

Vergleich der Eigenschaften von Thermobimetallen und Memory-Elementen

Tautzenberger, Stoeckel

Metall Wissenschaft & Technik
41. Jahrgang, Heft 1, Januar
pp. 26-32

1987

Vergleich der Eigenschaften von Thermobimetallen und Memory-Elementen

Dr. P. TAUTZENBERGER und Prof. Dr. D. STÖCKEL¹⁾

Mitteilung der Firma G. RAU GmbH & Co, Pforzheim

Sowohl Thermobimetalle als auch Memory-Elemente zeigen eine temperaturabhängige Formänderung. Nach einer Erläuterung der jeweiligen Grundlagen sowie wichtiger Daten zur Formänderung werden verschiedene Eigenschaften beider Bauteilgruppen einander gegenübergestellt: Temperatur-Weg-Kennlinie, physikalische und mechanische Eigenschaften, Arbeitsvermögen, thermischer Anwendungsbereich und Effektstabilität.

Both thermobimetals and shape memory elements show a temperature-dependent shape change. First the base of shape change and some data for these materials are explained. Then important properties of these two groups of elements are compared: temperature-deflection curve, physical and mechanical properties, limits of application, stability of shape change effect.

1 Thermobimetalle

1.1 Einleitung

Thermobimetalle sind Schichtverbundwerkstoffe, die aus mindestens zwei Komponenten mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bestehen. Da sich bei Erwärmung die eine Komponente stärker ausdehnt als die andere, entsteht eine temperaturabhängige Krümmung des Thermobimetalls.

Thermobimetalle sind seit mehr als 200 Jahren bekannt [1]. Sie werden als einfache und preiswerte Bauelemente für temperaturabhängige Steuer-, Meß- und Regelaufgaben eingesetzt [2].

Das wichtigste Kriterium für die Auswahl der Komponenten von Thermobimetall ist die thermische Ausdehnung. Die thermische Ausdehnung der Werkstoffe wird gekennzeichnet durch den linearen Ausdehnungskoeffizienten α . Ein Stab der Länge l_0 hat bei der Temperatur T eine Länge l_t , die sich wie folgt errechnet:

$$l_t = l_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Der Wert des linearen Ausdehnungskoeffizienten α ist temperaturabhängig. Daher wird für die Verwendung in einem größeren Temperaturbereich ein mittlerer Ausdehnungskoeffizient angegeben. Bei Thermobimetallen wird die Kompo-

nente mit der kleineren Wärmeausdehnung als passive Komponente und die Komponente mit der größeren Wärmeausdehnung als aktive Komponente bezeichnet.

1.2 Werkstoffe für Thermobimetalle

Als Werkstoffe für Thermobimetalle eignen sich Metalle und Legierungen, die folgende Bedingungen erfüllen:

- Werkstoffe für aktive Komponenten von Thermobimetallen sollen einen hohen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha \geq 15 \cdot 10^{-6}/K$ über einen möglichst großen Temperaturbereich aufweisen.
- Werkstoffe für passive Komponenten von Thermobimetallen sollen einen kleinen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha \leq 5 \cdot 10^{-6}/K$ über einen möglichst großen Temperaturbereich aufweisen.
- Werkstoffe für Komponenten von Thermobimetallen sollen eine gute Warm- und Kaltumformbarkeit, einen hohen Schmelzpunkt von $> 1000^\circ C$, einen hohen Elastizitätsmodul von $> 100 \text{ kN/mm}^2$, einen möglichst kleinen Temperaturkoeffizienten des Elastizitätsmoduls und eine hohe Festigkeit aufweisen. Schmelzpunkt, Elastizitätsmodul und Festigkeit der Komponenten eines Thermobimetalls sollen nicht zu verschieden voneinander sein.

Die Längenänderung der Metalle und Legierungen beträgt in der Regel vom absoluten Nullpunkt bis zum Schmelz-

punkt 2–3 %, d. h. die Ausdehnungskoeffizienten sind der Schmelztemperatur umgekehrt proportional.

Deutliche Abweichungen zu höheren Ausdehnungskoeffizienten zeigen Legierungen des Mangans mit Kupfer- und Nickelzusätzen, bei denen die Zusätze die duktile γ -Manganphase durch Mischkristallbildung stabilisieren. Ebenfalls deutliche Abweichungen zu höheren Ausdehnungskoeffizienten zeigen austenitstabilisierte Eisen-Nickel-Legierungen mit 24–25 % Nickel und Zusätzen an Mangan, Chrom oder Molybdän. Unter diesen weisen die Eisen-Nickel-Mangan-Legierungen die höchste Wärmeausdehnung auf. Auch rostfreie austenitische Chrom-Nickel-Stähle besitzen eine relativ hohe Wärmeausdehnung. Diese Werkstoffe, die auch die übrigen an Werkstoffe für Thermobimetalle gestellten Randbedingungen erfüllen, werden neben einigen Metallen und Legierungen für Sonderfälle bevorzugt als aktive Komponenten für Thermobimetalle eingesetzt.

Abweichungen zu sehr niedrigen Ausdehnungskoeffizienten weisen gewisse ferromagnetische Legierungen auf, die in ihrer Zusammensetzung dicht an der Grenze einer martensitischen Umwandlung liegen. Diese Legierungen zeigen den sogenannten Invar-Effekt, der erstmals 1897 bei den Eisen-Nickel-Legierungen entdeckt wurde und besonders ausgeprägt bei $20^\circ C$ bei der Eisen-Nickel-Legierung mit 36 % Nickel (Invar) vorliegt. Diese Legierung weist bei Raumtemperatur einen extrem kleinen Ausdehnungskoeffizienten von $1,2 \cdot 10^{-6}/K$ auf. Da Invar ein preisgünstiger Werkstoff ist und auch in seinen Eigenschaften die an Komponenten für Thermobimetalle gestellten Forderungen erfüllt, wird dieser Werkstoff am häufigsten als passive Komponente von Thermobimetall verwendet.

Die Eisen-Nickel-Legierung mit 36 % Nickel (Invar) besitzt nur bei Raumtemperatur einen extrem kleinen Ausdehnungskoeffizienten. Schon bei Erwärmung auf $100^\circ C$ steigt der Ausdehnungskoeffizient deutlich an. Daraus folgt, daß bei allen Thermobimetallen mit Invar als passiver Komponente die Ausbiegung bei Temperaturen über $150^\circ C$ stetig kleiner wird. Eisen-Nickel-Legierungen mit $> 36\%$ Nickel haben zwar einen größeren Ausdehnungskoeffizienten, aber dieser bleibt in einem größeren Temperaturbereich nahezu unverändert. Deshalb werden Eisen-Nickel-Legierungen mit 42 und 46 % Ni als passive Komponenten für Thermobi-

¹⁾ jetzt RAYCHEM CORP., Menlo Park, Kalifornien.

metalle verwendet, die auch bei höheren Temperaturen bis über 400°C eine gute thermische Ausbiegung ergeben [2].

Zur Herstellung von Thermobimetall werden geeignete Komponenten durch Kalt- oder Warmplattieren zu einem Schichtverbundwerkstoff verbunden. Die Weiterverarbeitung erfolgt nach abgestimmten Walzprogrammen auf Mehrrollenwalzwerken. In der Regel erhalten Thermobimetalle am Schluß der Verarbeitung eine Kaltumformung von 20 bis 30 %.

1.3 Spezifische thermische Krümmung

Gemäß DIN 1715 vom November 1983 gilt die spezifische thermische Krümmung k als Abnahmwert für die thermische Empfindlichkeit von Thermobimetallen. Die spezifische thermische Krümmung k wird nach Abb. 1 aus der gemessenen Ausbiegung A eines auf zwei Stützen der Stützweite L_M aufgelegten Thermobimetallstreifens der Dicke s bei der Temperaturdifferenz $T_2 - T_1$ nach folgender Formel berechnet:

$$k = \frac{8As}{(L_M^2 + 4A^2 + 4As)(T_2 - T_1)}$$

Die spezifische thermische Krümmung ist keine Konstante. Die Temperaturabhängigkeit der Ausbiegung eines Streifens verläuft daher nicht streng linear, sondern entsprechend einer Kurve wie in Abb. 2 dargestellt. Der Nennwert der spezifischen thermischen Krümmung gilt für den Temperaturbereich von 20 bis 130°C.

Als Linearitätsbereich wird gemäß Abb. 2 der Temperaturbereich bezeichnet, in dem die gemessene thermische Ausbiegung nicht mehr als $\pm 5\%$ von der Ausbiegung abweicht, die sich aus dem Nennwert der spezifischen thermischen Krümmung errechnet. Außerhalb des Linearitätsbereiches ist in gewissen Grenzen noch eine abnehmende, für viele Anwendungsfälle aber noch ausreichende Ausbiegung vorhanden. Deshalb geht der Anwendungsbereich häufig über den Linearitätsbereich hinaus.

Als Anwendungsgrenze wird diejenige Temperatur bezeichnet, bei der die Eigenschaften des Thermobimetalles gerade noch nicht bleibend verändert

werden. Diese Temperatur entspricht der Rekristallisationstemperatur des Thermobimetalles bei langzeitiger Beanspruchung und dem üblichen Kaltumformgrad von 20–30 %.

Die spezifische thermische Krümmung eines Thermobimetalles hängt von der Kaltverformung und der Alterung ab und zeigt aufgrund einer ausgeprägten Walztextur der Komponenten zusätzlich eine Richtungsabhängigkeit (Anisotropie). Der Nennwert der spezifischen thermischen Krümmung bezieht sich auf Thermobimetallstreifen in Walzrichtung mit einer abschließenden Kaltverformung von 20–30 % sowie einer entsprechenden Alterung zur Beseitigung von inhomogenen inneren Spannungen [2].

Die Vielzahl möglicher Werkstoffkombinationen hat weltweit zu über 100 verschiedenen Thermobimetallsorten geführt. In Tabelle 1 sind die Komponenten und einige Daten verschiedener Thermobimetallsorten aufgeführt.

Abb. 3 zeigt verschiedene Ausführungsformen von Bauelementen aus Thermobimetall wie Streifen, Scheiben, Spiralen und Wendeln, deren Formänderung jeweils auf der temperaturabhängigen Ausbiegung des blechförmigen Schichtverbundwerkstoffes beruht.

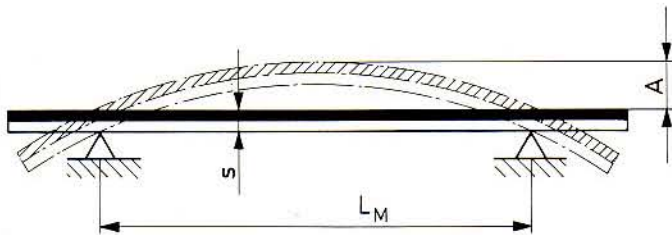


Abb. 1. Beidseitig aufgelegter Thermobimetall-Streifen (Streifen-dicke s , Stützweite L_M , Ausbiegung A).

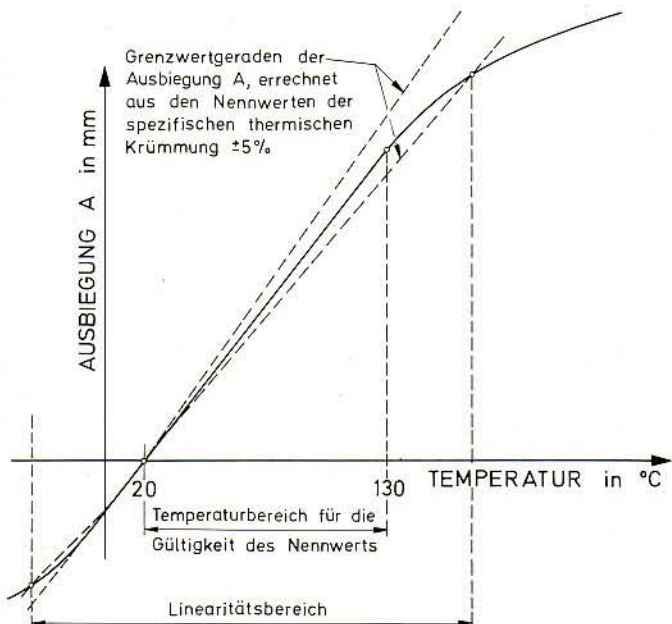


Abb. 2. Schematische Darstellung der Ausbiegungskurve eines Thermobimetalles.

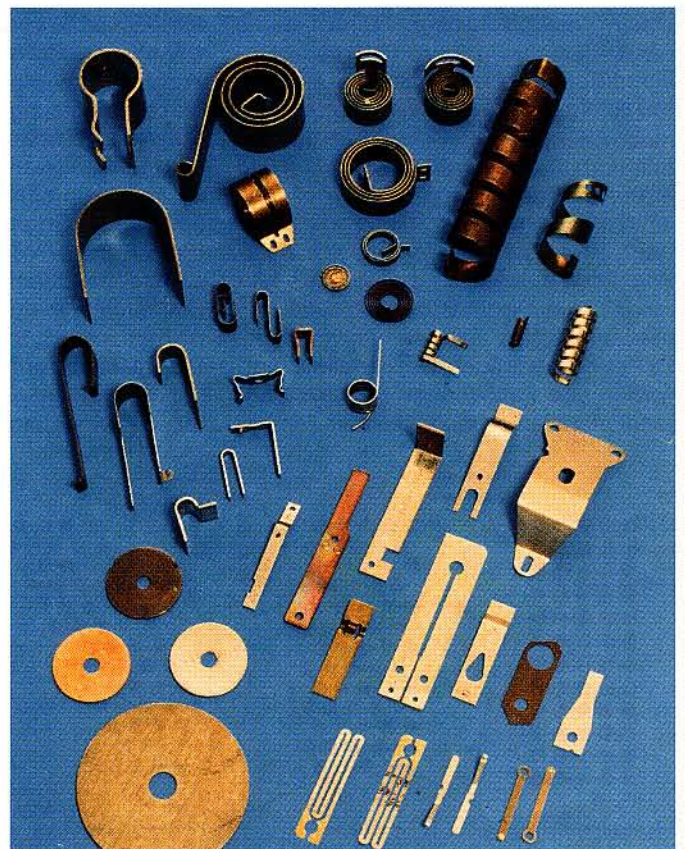


Abb. 3. Beispiele möglicher Ausführungsformen von Bauteilen aus Thermobimetallen.

Tabelle 1. Komponenten und Eigenschaften einiger Thermobimetalle.

Thermobimetallsorte	Aktive Komponente	Passive Komponente	Spez. therm. Krümmung ³⁾ 10 ⁻⁶ /K	Linearitätsbereich °C	Anwendungsgrenze °C
TB 1577 A ¹⁾	FeNi20Mn6	FeNi36	28,5	-20 bis +200	450
TB 20110 ¹⁾	MnCu18Ni10	FeNi36	39,0	-20 bis +200	350
MS ²⁾	MnNi15Cu10	FeNi32Co6	43,6	+20 bis +230	350
RS ²⁾	X12CrNi18 8	FeNi32Co14Ti1,5	18,0	-20 bis +400	650
RR ²⁾	X12CrNi18 8	X8Cr17	9,5	-20 bis +600	550

¹⁾ Kurzzeichen gemäß DIN 1715.

²⁾ MS, RS, RR sind Handelsnamen der Firma G. RAU GmbH & Co, Pforzheim. Diese Thermobimetallsorten sind nicht in DIN 1715 genormt.

³⁾ Nennwert für den Temperaturbereich von 20–130°C.

2 Bauteile mit Memory-Effekt

2.1 Grundlagen des Memory-Effektes

Unter dem Begriff Memory- oder Formgedächtnis-Legierungen sind verschiedene Legierungen bekannt geworden, die nach geeigneter Behandlung ebenfalls eine temperaturabhängige Formänderung aufweisen. Im Gegensatz zu den Thermobimetallen beruht hier der Formänderungseffekt auf einer thermoelastischen martensitischen Phasenumwandlung. Die ersten ausführlichen Arbeiten auf dem Gebiet der thermoelastischen martensitischen Umwandlung wurden bereits im Jahre 1949 veröffentlicht [3], jedoch begannen die Aktivitäten zur kommerziellen Nutzung des Memory-Effektes erst vor rund 25 Jahren. Intensive Arbeiten auf dem Gebiet der Memory-Legierungen wurden in den letzten fünf bis zehn Jahren durchgeführt.

Wie bereits erwähnt, beruht der Memory-Effekt auf einer thermoelastischen martensitischen Phasenumwandlung. Bei einer derartigen Umwandlung entstehen und wachsen die Martensitplatten kontinuierlich mit sinkender Tempe-

ratur und sie verschwinden genau in umgekehrter Weise bei Temperaturerhöhung, wobei stets ein Gleichgewicht zwischen zwei entgegengesetzten Energietermen vorliegt. Als treibende Kraft der Umwandlung wirkt die Differenz der Freien Enthalpie beider Phasen. Diesem Energieterm sind einige Energiebeiträge nichtchemischer Natur entgegengerichtet, von denen die mit der Phasenumwandlung verbundene elastische Verzerrungsenergie am wichtigsten ist [4, 5].

Der wesentliche Grund für die Reversibilität des thermoelastischen Martensits ist die Tatsache, daß nur sehr geringe elastische Spannungen bei der Umwandlung auftreten, die praktisch keine irreversible plastische Verformung durch Versetzungsbewegung bewirken. Die Verzerrungen, die beim Wachsen der Martensitplatten entstehen, werden durch Akkomodation der Platten innerhalb einer Gruppe weitgehend abgebaut. Darüber hinaus wird der Verzerrungsabbau durch Zwillingsbildung und Stapelfehler in den einzelnen Martensitplatten unterstützt [4].

Die meisten Formgedächtnis-Legierungen gehören zur Gruppe der sogenannten β -Phase-Legierungen, bei denen

eine Umwandlung von einer geordneten kubisch raumzentrierten Struktur in Martensit mit einer bestimmten Stapelfolge stattfindet. Als Beispiel seien die Strukturumwandlungen von B2 nach 9R sowie DO₃ nach 18R genannt [5]. Auf einige technisch anwendbare Formgedächtnis-Legierungen wird in Abschnitt 2.3 eingegangen.

Wird eine Memory-Legierung im martensitischen Zustand im Bereich unterhalb eines kritischen Verformungsgrades bleibend verformt, so erfolgt lediglich eine reversible Martensitverformung durch Verschieben von hochbeweglichen Grenzflächen wie Zwillingsgrenzen in einzelnen Martensitvarianten oder Grenzflächen zwischen benachbarten Martensitvarianten. Bei Erwärmung einer reversibel verformten Probe verschwindet der Martensit, und es entstehen die ursprünglichen Kristallorientierungen der Hochtemperaturphase, womit zwangsläufig eine Formrückkehr verbunden ist.

Der Mechanismus des Formgedächtniseffektes ist in vereinfachter Weise in Abb. 4 dargestellt. Abb. 4 a zeigt einen Einkristall einer Formgedächtnislegierung in der Hochtemperaturphase, der sich beim Abkühlen in eine verzwilligte Martensitstruktur ohne makroskopische Formänderung umwandelt (Abb. 4 b). Durch Einwirkung einer ausreichenden Spannung erfolgt eine bleibende Verformung durch Bewegen von Zwillingsgrenzen (Abb. 4 c). Beim Erwärmen über eine bestimmte Temperatur kehrt die Probe aufgrund der Reversibilität der thermoelastischen martensitischen Umwandlung zu ihrer ursprünglichen Form zurück (Abb. 4 d) [5].

2.2 Einweg- und Zweiwegeeffekt

Wird eine Memory-Legierung im martensitischen Zustand im Bereich unterhalb eines kritischen Verformungsgrades bleibend verformt, so findet lediglich reversible Martensitverformung statt. Beim Erwärmen erfolgt eine Umwandlung in die Hochtemperaturphase, mit der die Einstellung der ursprünglichen Probenform einhergeht. Da eine anschließende Abkühlung keine weitere Formänderung bewirkt, spricht man hier vom sogenannten Einwegeffekt.

Beim Erwärmen eines Elementes mit Einwegeffekt erfolgt zunächst keine Bewegung. Erst beim Erreichen der sogenannten A_s-Temperatur beginnt die Formänderung, wobei die gesamte Effektfaltung in einem kleinen Temperaturbereich, zum Beispiel 10 bis 20 K, erfolgt. Die A_s-Temperatur kann je nach Legierungssystem zwischen etwa

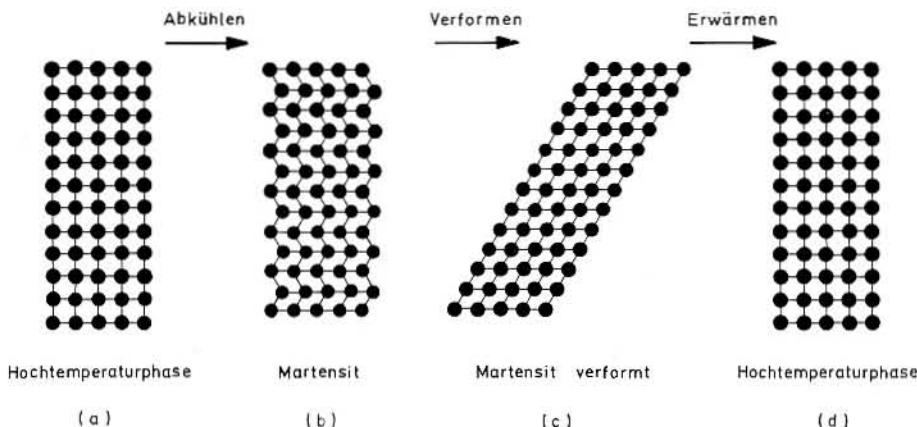


Abb. 4. Schematische Darstellung des Memory-Effektes.

-150°C und +150°C liegen. Innerhalb dieses Bereiches können beliebige A_s -Werte durch die Legierungszusammensetzung gezielt eingestellt werden. Richtwerte für die maximalen A_s -Temperaturen sowie die Größe des Einwegeffektes technisch anwendbarer Legierungsgruppen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Überschreitet die Verformung einer Memory-Legierung im martensitischen Zustand einen bestimmten Betrag, so tritt neben reversibler Martensitverformung auch irreversible plastische Verformung auf, wobei eine bestimmte Versetzungsstruktur erzeugt wird. Bei Erwärmung wird zunächst der reversible Anteil der Martensitverformung rückgängig gemacht, wodurch eine Formänderung in Richtung der Ausgangsform stattfindet. Beim Abkühlen bilden sich unter dem Einfluß des Spannungsfeldes der Versetzungen bevorzugte Martensitvarianten, welche die Entstehung einer bestimmten Nieder-temperaturform bewirken. Somit „erinnert“ sich die Probe sowohl an eine Hochtemperatur- als auch an eine Nieder-temperaturform. Dieser Formänderungsvorgang wird als Zweiwegeeffekt bezeichnet und bleibt über hohe Zyklenzahlen erhalten [5].

Die Temperatur-Weg-Kennlinie eines Elementes mit Zweiwegeeffekt ist schematisch in Abb. 5 dargestellt. Ähnlich wie beim Einwegeffekt beginnt auch hier die Formänderung bei Erwärmung erst bei der sogenannten A_s -Temperatur. Bei weiterem Aufheizen erfolgt dann die gesamte Formänderung in einem kleinen Temperaturintervall (zum Beispiel 20 K). Die Temperatur-Weg-Abhängigkeit weist eine Hysterese auf, deren Größe durch geeignete Maßnahmen beeinflusst werden kann. Je nach Legierung und Werkstoffbehandlung beträgt die Hysterese etwa 10–30 K. Die Maximalwerte des Zweiwegeeffektes technisch anwendbarer Legierungen

Tabelle 2. Eigenschaften technisch anwendbarer Memory-Legierungen.

Eigenschaft	Legierung		
	NiTi	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Dichte (g/cm ³)	6,4 – 6,5	7,8 – 8,0	7,1 – 7,2
Elektrische Leitfähigkeit (10 ⁶ $\frac{S}{m}$)	1 – 1,5	8 – 13	7 – 9
Zugfestigkeit (N/mm ²)	800 – 1000	400 – 700	700 – 800
Bruchdehnung (%)	40 – 50	10 – 15	5 – 6
Maximale A_s -Temperatur (°C)	120	120	170
Maximaler Einwegeffekt (%)	8	4	5
Maximaler Zweiwegeeffekt (%)	5	1*)	1,2
Überhitzbarkeit bis (°C)**)	400	160	300

*) 1% bedeutet bei einem einseitig eingespannten Biegeelement mit einer Dicke von 1 mm und einer freien Länge von 50 mm eine Ausbiegung von annähernd 25 mm am freien Ende.
**) Nur kurzzeitige Überhitzung.

sind in Tabelle 2 aufgeführt. Auf die Möglichkeit der gezielten Einstellung von A_s -Temperaturen sowie auf die maximalen A_s -Werte wurde bereits hingewiesen. Zwei Beispiele für Elemente mit Zweiwegeeffekt sind in Abb. 6 darge-

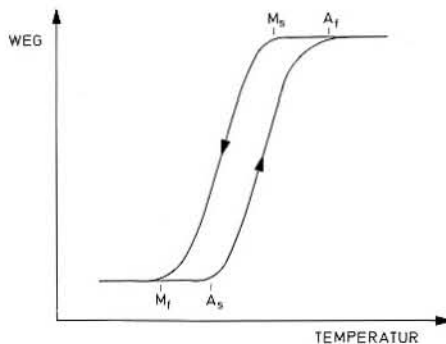


Abb. 5. Temperatur-Weg-Kennlinie eines Memory-Elementes mit Zweiwegeeffekt. A_s und A_f : Temperatur, bei der die Bildung der Hochtemperaturphase beim Erwärmen beginnt bzw. beendet ist. M_s und M_f : Temperatur, bei der die Martensitbildung beim Abkühlen beginnt bzw. beendet ist.

stellt. Weitere Ausführungsformen von Memory-Bauteilen zeigt Abb. 7. Elemente mit Zweiwegeeffekt zeigen einen reversiblen Formänderungseffekt ohne äußere Hilfsmaßnahmen. Darüber hinaus kann man eine reversible Formänderung auch dadurch bewirken, daß man den Einwegeffekt mit Hilfe einer äußeren Kraft stets von neuem erzeugt. Als Beispiel sei hier eine Zugfeder aus Nickel-Titan aufgeführt, die bei hoher Temperatur im Blockzustand vorliegt, d. h. die Windungen berühren einander. Ohne äußere Zugbelastung tritt keine temperaturabhängige Formänderung auf. Bei tiefer Temperatur, bei der die weiche martensitische Phase vorliegt, verlängert sich die Memory-Feder durch Einwirkung einer äußeren Zugkraft. Beim anschließenden Erwärmen läuft der entsprechende Einwegeffekt ab, wobei die Feder sich wieder auf den Blockzustand zusammenzieht und dabei Arbeit leistet. Bei der Durchführung weiterer Temperaturzyklen in Verbindung mit einer äußeren Zugbelastung wiederholt sich die reversible Formänderung jeweils in gleicher Weise. Die

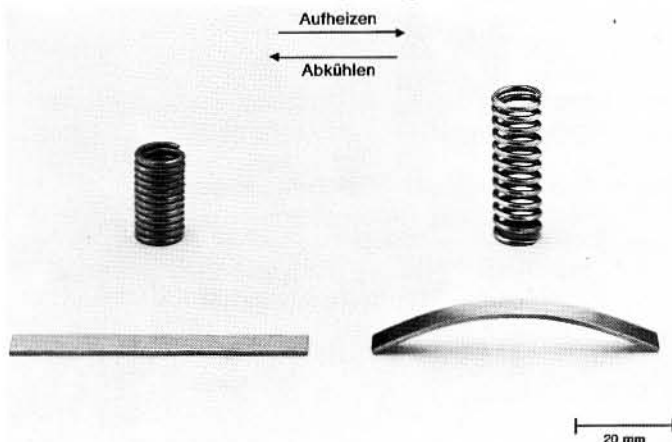


Abb. 6. Druckfeder und Biegestreifen mit Zweiwegeeffekt aus einer Cu-Zn-Al-Legierung ($A_s \approx 65^\circ\text{C}$, $A_f \approx 80^\circ\text{C}$, $M_s \approx 65^\circ\text{C}$, $M_f \approx 50^\circ\text{C}$).

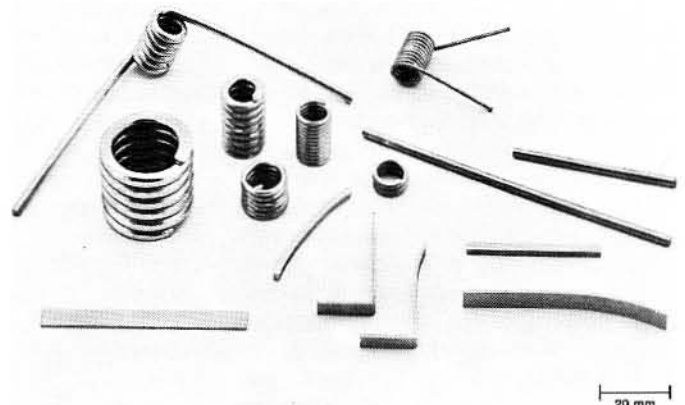


Abb. 7. Beispiele möglicher Ausführungsformen von Memory-Elementen.

hier beschriebene Methode zur Erzeugung einer reversiblen temperaturabhängigen Formänderung kann bei bestimmten Anwendungsfällen eine preisgünstigere Lösung darstellen als die Herstellung von Elementen, die den eigentlichen Zweiweg-Memoryeffekt zeigen (Abb. 6).

2.3 Technisch anwendbare Legierungen

Bauteile mit Memory-Effekt haben aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften ein großes praxisbezogenes Interesse hervorgerufen. Für technische Anwendungen sind bislang jedoch erst die drei Legierungsgruppen NiTi, Cu-Zn-Al und Cu-Al-Ni geeignet.

Als Prototyp der technisch anwendbaren Formgedächtnislegierungen gilt Nickel-Titan mit annähernd stöchiometrischer Zusammensetzung. Unter dem Namen Nitinol wurde dieser Werkstoff vor rund 25 Jahren in den USA entwickelt [6]. Nickel-Titan zeichnet sich unter anderem durch einen besonders großen Ein- und Zweiwegeeffekt, eine relativ hohe Überhitzbarkeit sowie eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit aus. Als Nachteile gelten vor allem die schlechte Zerspanbarkeit sowie der hohe Preis.

Als zweite Generation der Memory-Legierungen wurden in den letzten Jahren die billigeren Kupferbasislegierungen Cu-Zn-Al entwickelt [7], die jedoch eine schlechtere Korrosionsbeständigkeit und eine geringe Überhitzbarkeit aufweisen.

Des Weiteren wurden die Kupferbasislegierungen Cu-Al-Ni entwickelt [8], mit denen erhöhte Schalttemperaturen und hohe Überhitzbarkeit erreicht werden können. Nachteile stellen hier die geringe Duktilität sowie die schlechte Zerspanbarkeit dar. Einige physikalische und mechanische Eigenschaften sowie die Memory-Daten der drei Legierungsgruppen sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Die aufgeführten Eigenschaften hängen von verschiedenen Einflußgrößen ab und wurden daher durch Wertespanspannen oder Maximalwerte angegeben.

Die ersten Anwendungen von Memory-Bauteilen beruhten auf dem Einwegeffekt. Hierzu zählen beispielsweise Verbindungselemente wie Schrupftringe und Klammern. In den letzten Jahren sind verschiedene Anwendungsmöglichkeiten bekannt geworden, bei denen Elemente mit Zweiwegeeffekt verwendet werden: Thermoventile, Lüftungsklappen, Schutzlamellen für Nebelscheinwerfer, thermische Schutzschalter [9].

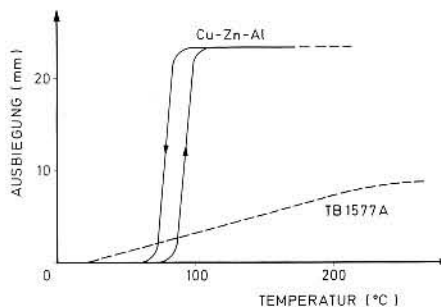


Abb. 8. Temperatur-Ausbiegungs-Charakteristik für ein einseitig eingespanntes Biegeelement aus Cu-Zn-Al mit einem Zweiwegeeffekt von 1 % sowie für einen gleich dimensionierten Thermobimetallstreifen der Sorte TB 1577 A (bei Raumtemperatur flach, Dicke 1 mm, freie Länge 50 mm).

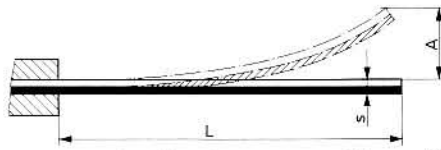


Abb. 9. Einseitig eingespannter Thermobimetall-Streifen (Streifendicke s , freie Länge L , Ausbiegung A).

3 Vergleich der Eigenschaften von Thermobimetallen und Memory-Elementen

3.1 Grundlegende Anmerkungen

Die unterschiedliche Grundlage der Formänderung bei Thermobimetallen und Memory-Elementen bedingt erwartungsgemäß deutliche Unterschiede in den Eigenschaften beider Bauteilgruppen.

Die besonderen Eigenschaften der Thermobimetalle lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Lineare Temperatur-Weg-Abhängigkeit,
- Linearitätsbereich bis etwa 600 °C,
- Anwendungsgrenze ca. 650 °C,
- außerordentlich hohe Stabilität des Formänderungseffektes (bis ca. 20 Millionen Zyklen).

Dagegen weisen Bauteile mit Memory-Effekt folgende Besonderheiten auf:

- Nahezu sprungartige Formänderung, d.h. die gesamte Effektfaltung erfolgt in einem kleinen Temperaturintervall,
- großes Arbeitsvermögen pro Volumeneinheit,
- Möglichkeit zur Durchführung verschiedener Formänderungsarten (Verlängerung, Verkürzung, Biegung, Torsion),
- Effekt kann auf bestimmte Elementbereiche beschränkt werden.

Als Nachteil der Memory-Elemente gelten bestimmte Einschränkungen hinsichtlich der Effekstabilität, der Überhitzbarkeit und des thermischen An-

wendungsbereiches (-150 bis etwa +150 °C).

3.2 Temperatur-Weg-Kennlinie

Bezüglich der Temperatur-Weg-Kennlinie beider Bauteilgruppen liegen wesentliche Unterschiede vor. Abb. 8 zeigt die Temperatur-Ausbiegungs-Charakteristik für ein einseitig eingespanntes Biegeelement aus Cu-Zn-Al mit einem Zweiwegeeffekt von 1 % sowie für einen gleich dimensionierten Thermobimetallstreifen der Sorte TB 1577 A.

Zur Verdeutlichung der starken Krümmung des Memory-Streifens in Abb. 8 sei hier auf die Formel für die Dehnung bzw. Stauchung in den Randfasern eines gebogenen Streifens verwiesen:

$$\epsilon_b = \frac{s}{2R}$$

ϵ_b = Dehnung bzw. Stauchung in den Randfasern des Biegeelementes (= Größe des Memory-Biegeeffektes),

s = Streifendicke,

R = Krümmungsradius des Biegestreifens.

Bei einem 1 mm dicken und bei tiefer Temperatur flachen Memory-Streifen ergibt ein Memory-Biegeeffekt von 1 % einen Krümmungsradius von 50 mm bei hoher Temperatur. Bei einer freien Länge von 50 mm erhält man somit eine reversible Bewegung des freien Endes von etwa 25 mm in einem Temperaturintervall von ca. 40 K.

Bei Thermobimetallen erstreckt sich der vollständige Effektablauf über einen weit größeren Temperaturbereich. Die Ausbiegung eines einseitig eingespannten Streifens, wie in Abb. 9 dargestellt, läßt sich im Linearitätsbereich näherungsweise mittels folgender Formel ermitteln [2]:

$$A \approx \frac{k}{2} \cdot \frac{L^2 \cdot \Delta T}{s}$$

A = Ausbiegung,

k = spezifisch thermische Krümmung,

L = freie Länge,

ΔT = Temperaturdifferenz,

s = Streifendicke.

Für das Standard-Thermobimetall TB 1577 A in Abb. 8 mit $L = 50$ mm, $s = 1$ mm und $k = 28,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ergibt sich mit $\Delta T = 40$ K – in Analogie zum Memorystreifen – eine Ausbiegung von etwa 1,5 mm. Mit $\Delta T = 200$ K erhält man eine 5fach größere Ausbiegung. Andererseits ist es bei der Memory-Legierung Nickel-Titan möglich, den Memory-Ef-

fekt bis auf etwa 5% zu erhöhen, wodurch eine weit höhere Ausbiegung als beim Cu-Zn-Al-Element in Abb. 8 auftritt. Im Hinblick auf eine hohe Effektstabilität darf jedoch die maximal mögliche Größe des Zweiwegeeffektes nicht voll ausgeschöpft werden.

Diese Anmerkungen zeigen, daß ein Vergleich der Ausbiegungscharakteristik von Thermobimetallen und Memory-Elementen stets von den Randbedingungen abhängt. Hinzu kommt, daß bei Memory-Bauteilen bestimmte Ausführungsformen wie Zug- und Druckfedern mit axialer Wegentfaltung hergestellt werden können. Derartige Elementformen sind bei Thermobimetallen nicht realisierbar.

Wie aus Abb. 8 zu entnehmen ist, weist die Ausbiegungscharakteristik von Memory-Elementen mit Zweiwegeeffekt eine Hysterese auf, die je nach Legierungsgruppe und Werkstoffbehandlung etwa 10–30 K beträgt. Dagegen liegt bei Thermobimetallen praktisch keine Hysterese vor. Aus Thermobimetallen lassen sich jedoch mechanisch vorgewölbte Bauteile, sogenannte Schnappscheiben, herstellen, deren Formänderung sprungartig und hysteresebehaftet abläuft, wobei eine gewisse Ähnlichkeit mit der Kennlinie von Memory-Legierungen vorliegt [10]. Die meisten Anwendungen von Schnappscheiben liegen jedoch im Bereich kleiner Wege und Kräfte.

3.3 Physikalische und mechanische Eigenschaften

In Tabelle 3 sind die Daten für einige physikalische und mechanische Eigen-

schaften von Thermobimetallen und Memory-Legierungen dargestellt.

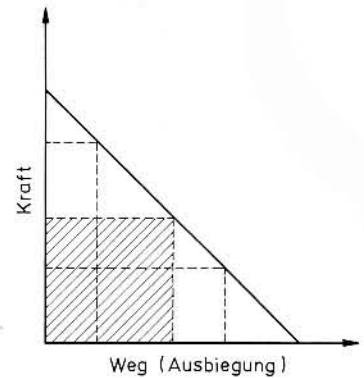
Wegen der Vielzahl von Thermobimetallsorten wurden die entsprechenden Daten in Form von Wertespanssen zusammengefaßt. Die hohen Werte für die elektrische Leitfähigkeit von Thermobimetallen werden dadurch erzielt, daß Kupferschichten zwischen den eigentlichen Komponenten eingebaut werden [2].

Die meisten Kennwerte der Memory-Legierungen wurden ebenfalls als Wertespanssen angegeben. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Daten unter anderem von der Legierungszusammensetzung und von der Gitterstruktur abhängen. So liegt beispielsweise bei der elektrischen Leitfähigkeit zwischen der Hochtemperatur- und der Niedertemperaturphase einer vorgegebenen Legierung ein Unterschied von etwa 10–20% vor. Die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit mit Hilfe hochleitfähiger Zwischenschichten, wie sie bei Thermobimetallen praktiziert wird, ist im Prinzip auch bei Memory-Legierungen durchführbar [11].

Die Daten für die zulässige Spannung der Memory-Legierungen stellen lediglich Richtwerte dar. Im Hinblick auf eine möglichst hohe Effektstabilität sind hier je nach Anwendungsfall mitunter Abstriche erforderlich.

3.4 Arbeitsvermögen

In Abb. 10 ist die Kraft-Weg-Abhängigkeit eines Thermobimetalles dargestellt. Eine einfache geometrische Überlegung zeigt, daß ein maximales Arbeitsvermögen



$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \times \text{Weg}$$

Abb. 10. Kraft-Ausbiegungs-Schaubild von Thermobimetall.

gen pro Volumeneinheit und damit ein minimaler Materialeinsatz dann gegeben ist, wenn die Hälfte der verfügbaren Wärmeenergie in Kraft und die andere Hälfte in Bewegung umgesetzt wird. Dabei gilt gemäß [2]:

$$\frac{W_{\max}}{V} \approx \frac{k^2 \cdot E}{64} \cdot (\Delta T)^2$$

- W_{\max} = maximales Arbeitsvermögen,
- V = Volumen des Thermobimetallstreifens,
- k = spezifische thermische Krümmung,
- E = Elastizitätsmodul,
- ΔT = Temperaturänderung.

Für das Standard-Thermobimetall TB 1577A ergibt sich mit $\Delta T = 100$ K ein Arbeitsvermögen pro Volumeneinheit von etwa $0,02 \text{ MJ/m}^3$. Mit einer größeren Temperaturänderung ΔT würde sich natürlich ein höheres Arbeitsvermögen ergeben.

Für Memory-Elemente mit Zweiwegeeffekt und den bereits erwähnten Daten für Effektgröße und zulässige Spannung erhält man für das Arbeitsvermögen pro Volumeneinheit je nach Legierungsgruppe einen Anhaltswert in der Größenordnung von $1 - 5 \text{ MJ/m}^3$. Dieses Arbeitsvermögen wird in einem Temperaturintervall von nur rund 40 K erreicht und ist wesentlich größer als bei Thermobimetallen. Ein Blick auf Tabelle 3 zeigt, daß die zulässigen Spannungen von Thermobimetallen und Memory-Bauteilen in der gleichen Größenordnung liegen. Somit ist das hohe Arbeitsvermögen der Memory-Elemente primär auf die große Wegentfaltung zurückzuführen. Die Größe des tatsächlich nutzbaren Arbeitsvermögens von Memory-Legierungen hängt von der geforderten Effektstabilität ab. Bei Thermobimetallen ist lediglich eine Biege-Formänderung möglich, wobei in der Regel eine

Tabelle 3. Physikalische und mechanische Eigenschaften von Thermobimetallen und Memory-Legierungen.

Eigenschaft	Thermobimetalle bei 20°C ¹⁾	Memory-Legierungen ²⁾		
		NiTi	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Dichte (g/cm ³)	7,8 – 8,4	6,4 – 6,5	7,8 – 8,0	7,1 – 7,2
Elektrische Leitfähigkeit (10 ⁶ $\frac{S}{m}$)	0,7 – 20	1 – 1,5	8 – 13	7 – 9
Zulässige Spannung (N/mm ²)	200 – 250 ³⁾	250	75	100
Zugfestigkeit (N/mm ²)	600 – 900	800 – 1000	400 – 700	700 – 800
Bruchdehnung (%)	2 – 10	40 – 50	10 – 15	5 – 6

¹⁾ Gebräuchliche Thermobimetalle mit Kaltverformung 20–30%.

²⁾ Eigenschaften hängen unter anderem von der Legierungszusammensetzung und der Kristallstruktur ab.

³⁾ Die Sorte RS (Tabelle 1) stellt Ausnahme dar und kann bis 500 N/mm² belastet werden.

unvollständige Materialnutzung vorliegt. Dagegen kann bei bestimmten Memory-Elementformen wie beispielsweise drahtförmige Zugelemente mit homogener Spannungsbeaufschlagung eine 100%ige Nutzung des eingesetzten Materials im Hinblick auf das Arbeitsvermögen erreicht werden.

Memory-Bauteile haben in der Hochtemperatur-Phase eine höhere Festigkeit als in der Niedertemperatur-Phase. Daher können diese Bauteile nur beim Erwärmen gegen eine äußere Kraft arbeiten. Beim Abkühlen hingegen entsteht die weichere Niedertemperaturstruktur, wobei dann äußere Kräfte, die der Element-Rückstellung entgegen gerichtet sind, den Memory-Effekt behindern würden.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß Memory-Elemente ein höheres Arbeitsvermögen als Thermobimetalle aufweisen, wobei jedoch ein Vergleich stets von den Randbedingungen abhängt.

3.5 Thermischer Anwendungsbereich und Effektstabilität

Wie aus Tabelle 1 zu entnehmen ist, kann der Linearitätsbereich handelsüblicher Thermobimetalle von -20 bis etwa $+600^\circ\text{C}$ reichen, während der Höchstwert für die Anwendungsgrenze bei Langzeitbeanspruchung 650°C beträgt.

Thermobimetalle zeigen eine außerordentlich hohe Stabilität des Formänderungseffektes, wobei in der Praxis bis zu etwa 20 Millionen Temperatur-Zyklen erreicht werden.

Bei den Memory-Legierungen können die A_s -Schalttemperaturen je nach Legierungsgruppe zwischen etwa -150°C und $+150^\circ\text{C}$ liegen. Bei manchen Anwendungen werden die Memory-Bauteile über die A_f -Temperatur hinaus erwärmt. Die in Tabelle 2 aufgeführten Grenzwerte für die Überhitzung gelten für sehr kurze Zeiten. Bereits nach wenigen Minuten tritt bei diesen Temperaturen eine Beeinträchtigung des Formgedächtniseffektes auf. Dabei kann eine Verminderung des Weges sowie eine Verschiebung der Nullpunktlage und der Schalttemperatur erfolgen. Für Langzeit-Überhitzungen müssen niedrigere Überhitzungs-Grenzwerte eingehalten werden. Bei optimaler Technik zur Erzeugung des reversiblen Formänderungseffektes liegt dieser Grenzwert beispielsweise für Nickel-Titan-Elemente bei etwa $250-300^\circ\text{C}$.

Die Stabilität des Zweiweg-Memoryeffektes wird auch von der Größe des genutzten Arbeitsvermögens, d. h. vom

Tabelle 4. Stabilität des Memory-Effektes.

Legierungsgruppe	Zahl der thermischen Zyklen	Verminderung der Effektgröße
NiTi	100 000	praktisch kein Abbau
Cu-Zn-Al	10 000	ca. 10 %
Cu-Al-Ni	1 000	ca. 10 %

Produkt aus Weg und Kraft, beeinflusst. Daher wird man beispielsweise bei Nickel-Titan im Hinblick auf eine möglichst hohe Stabilität nicht den maximal möglichen Zweiwegeffekt von 5 % nutzen, sondern lediglich etwa 2 %.

Auch die vom Memory-Element zu bewältigende Kraft sollte bestimmte Werte nicht überschreiten, da andernfalls irreversible Verformung durch Versetzungsbewegung und damit eine Effektbeeinträchtigung erfolgt. Die zulässigen Spannungen für die Memorylegierungen in Tabelle 3 stellen nur Richtwerte dar. Je nach Anwendungsfall und Anforderung hinsichtlich Effektstabilität müssen zum Teil geringere Werte eingehalten werden. Als grobe Anhaltswerte für die Stabilität des Memory-Effektes können die in Tabelle 4 aufgeführten Daten angesehen werden, wobei sich die verschiedenen Parameter wie Effektgröße, Spannung, Temperaturbereich und Überhitzung in angemessenen Grenzen halten müssen.

Die tatsächliche Stabilität und die Funktionstüchtigkeit der Memory-Bauteile für einen gegebenen Anwendungsfall müssen direkt im entsprechenden Gerät unter anwendungsspezifischen Bedingungen erprobt werden. Gemäß Tabelle 4 weisen die Kupferbasis-Legierungen eine starke Einschränkung der Effektstabilität auf. Dennoch gibt es verschiedene Anwendungsmöglichkeiten, bei denen bestimmte Eigenschaften der Kupferbasis-Legierungen vorteilhaft sind, wie beispielsweise die erhöhte Wärmeleitfähigkeit dieser Werkstoffe.

Durch Beaufschlagung von Memory-Elementen mit tiefen Temperaturen, beispielsweise bis in die Nähe des absoluten Nullpunktes, wird der Memory-Effekt praktisch nicht beeinträchtigt, da in diesem Temperaturbereich in der Regel keine Gefüge- oder Strukturveränderungen stattfinden.

Die Schalt- oder A_s -Temperatur von Formgedächtnis-Legierungen wird durch die Legierungszusammensetzung vorgegeben. Dabei liegt eine äußerst starke Abhängigkeit vor, so daß je nach Legierungssystem bereits eine Änderung der Legierungszusammensetzung

von etwa 0,1 % eine Verschiebung der A_s -Temperatur um 10 K bewirkt. Die Streuung der A_s -Temperatur innerhalb einer Charge ist bei Anwendung optimaler Herstellungstechniken in der Regel nicht größer als ± 1 K. Schwieriger hingegen ist die Einengung der A_s -Streuung von Charge zu Charge. Hier ist bei angemessenem Herstellungsaufwand mit einer A_s -Streuung bis zu ± 5 K zu rechnen.

4 Ausblick

Formgedächtnis-Legierungen stellen eine vergleichsweise junge Werkstoffgruppe dar, deren außergewöhnliche Eigenschaften auf einer thermoelastischen martensitischen Phasenumwandlung beruhen. Aufgrund der komplexen werkstofftechnischen Materie sind für die Einführung von Bauteilen mit Memory-Effekt in die Technik intensive Gespräche zwischen Hersteller und Anwender erforderlich. Die derzeitigen Entwicklungen deuten darauf hin, daß in den nächsten Jahren eine rasche Zunahme der bislang geringen Zahl von Anwendungsfällen erfolgen wird.

Aufgrund der großen Unterschiede in den Eigenschaften können Memory-Bauteile die klassischen Thermobimetall-Elemente sicherlich nur in geringem Maße ersetzen. Vielmehr ist zu erwarten, daß mit Hilfe der Memory-Bauteile vor allem neue Anwendungsgebiete für thermisch aktive Bauteile erschlossen werden können [9].

Literatur

- Lambert, J. H.: Pyrometrie oder vom Maasse des Feuers und der Wärme, Berlin 1779, S. 124.
- Rau, G.: Thermobimetalle, Firmenschrift 1979.
- Kurdyumov, G. V.; Khandros, L. G.: Dokl. Akad. Nauk. SSSR 66 (1949), S. 211.
- Perkins, J.: Mat. Sci. Eng. 51 (1981), S. 181-192.
- Otsuka, K.; Shimizu, K.: Proc. of Int. Summer Course on Martensitic Transformations, Katholieke Universiteit Leuven (1982), S. 81.
- Jackson, C. M.; Wagner, H. J.; Wasilewski, R. J.: NASA-Report, SP5110 (1972), S. 1-86.
- Delaey, L.; Aernoudt, E.; Roos, J.: METALL 31 (1977), S. 1325-1331.
- Duerig, T. W.; Albrecht, J.; Gessinger, G. H.: Journal of Metals 34 (12), (1982), S. 14-20.
- Tautzenberger, P.; Stöckel, D.: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 81 (12), (1986), S. 703-708.
- Schneider, F. E.; u. a.: Thermobimetalle, Expert-Verlag, 1982, S. 93.
- Tautzenberger, P.; Stöckel, D.: Tagungsband Verbundwerkstoffe, Band 2, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel (1984), S. 185.